

空气潜孔锤钻进技术发展及应用现状

曹珂 韩刚 付文斌

黄河勘测规划设计研究院有限公司 河南 洛阳 471000

摘要：空气潜孔锤钻进技术是一种集气动冲击与旋转切削于一体的高效钻进方法，具有钻进效率高、破岩能力强、环境扰动小等特点，广泛应用于地质勘探、矿山开采、地热开发等领域。本文系统阐述了空气潜孔锤的基本原理与分类，梳理了其发展历程与技术趋势，分析了国内外应用现状与典型案例，并针对关键技术问题提出对策。研究表明，空气潜孔锤技术正朝着高压、智能化、环保化方向发展，未来在绿色勘探与智能施工领域具有广阔应用前景。本文旨在为该技术的进一步推广与创新提供理论参考与实践指导。

关键词：空气潜孔锤；钻进技术；硬岩破碎；地质勘探；智能化钻进

引言：在全球基础设施建设提速与绿色发展理念深入践行的背景下，岩土工程领域对钻进技术的高效性、低扰动性与环保性提出了更高要求。传统钻进技术在硬岩、破碎地层等复杂工况下，普遍存在效率低下、成本高昂、环境影响大等痛点，难以满足现代工程建设需求^[1]。空气潜孔锤钻进技术凭借其独特的气动冲击-旋转复合破岩机理，在解决复杂地层钻进难题上展现出显著优势，已成为岩土工程领域的关键技术之一^[2]。本文基于国内外相关研究成果与工程实践，系统梳理该技术的发展脉络、核心原理与应用现状，剖析现存关键技术瓶颈并提出解决方案，为推动技术升级与行业应用提供全面支撑

1 绪论

1.1 研究背景与意义

随着岩土工程领域对高效、环保、低扰动钻进技术的需求日益迫切，传统旋转钻进方法在硬岩、破碎地层中的局限性逐渐凸显。空气潜孔锤钻进技术通过压缩空气驱动活塞高频冲击钻头，结合钻杆旋转切削，实现硬岩快速破碎，其钻进效率较传统方法提高30%-50%，且排渣能力强，适用于干旱、缺水地区或对水质敏感的工程场景^[3]。该技术的推广应用，不仅能降低施工成本、缩短工期，还能减少爆破作业带来的安全隐患与环境破坏，对推动岩土工程绿色化发展具有重要意义。

1.2 国内外研究现状

空气潜孔锤技术起源于20世纪初的风动凿岩机，20世纪50年代逐渐发展为独立的钻进系统。国外方面，阿特拉斯·科普柯（Atlas Copco）、英格索兰（Ingersoll Rand）等企业率先研发出高压潜孔锤设备，广泛应用于矿山与能源开发领域；国内方面，长沙矿冶研究院、北京探矿工程研究所等单位在潜孔锤结构优化、工艺参数调控等方面取得突破，自主研发的大功率潜孔锤已达

到国际先进水平^[4]。近年来，国内外学者围绕复杂地层适应性、智能化控制等方向展开研究，推动技术向更高层次发展。

1.3 研究内容与方法

本文采用文献调研、案例分析与对比研究相结合的方法，系统梳理空气潜孔锤技术的发展脉络与应用现状。研究框架包括：基本原理与分类（第二章）、发展历程与趋势（第三章）、应用领域与案例（第四章）、关键问题与对策（第五章）、经济效益与社会效益（第六章）及结论与展望（第七章）。

2 空气潜孔锤钻进技术的基本原理与分类

2.1 工作原理

空气潜孔锤的核心是气动冲击与回转复合钻进机理：气动冲击：压缩空气经钻杆进入冲击器，驱动活塞往复运动，高频冲击钻头（冲击频率通常为1000-3000次/分钟），使岩石产生疲劳破碎；回转切削：钻杆带动钻头缓慢旋转（转速通常为10-50转/分钟），将冲击破碎的岩屑切削成块状，通过压缩空气沿钻杆与孔壁间隙排出孔外；破岩过程：冲击能量通过钻头传递至岩石表面，形成裂纹扩展，旋转运动扩大破碎范围，二者协同作用实现高效破岩。

2.2 结构类型

根据结构与工作介质的不同，空气潜孔锤可分为三类：

类型	结构特点	适用场景
单体潜孔锤	冲击器与钻头一体化设计	中小孔径（Φ80-Φ200mm）勘探孔
组合式潜孔锤	冲击器与扩孔器组合	大孔径（Φ300-Φ1000mm）成孔
水动力潜孔锤	以高压水为动力介质	水下或潮湿地层钻进

2.3 关键性能参数与影响因素

关键参数：冲击频率（1000-3000次/min）、冲击功（50-500J）、工作气压（0.7-5MPa）、耗气量（5-50m³/min）；影响因素：岩性：硬岩（如花岗岩）需高冲击功，软岩需降低冲击频率；孔径与孔深：大孔径需增加耗气量，深孔需优化排粉风速（≥15m/s）；地层条件：破碎带需采用套管跟进或泡沫钻进技术。

3 空气潜孔锤钻进技术的发展历程与趋势

3.1 发展历程概述

早期阶段（1900-1950）：以风动凿岩机为基础，主要用于矿山凿岩；成型阶段（1950-1980）：潜孔锤技术独立发展，出现中压（1-2MPa）设备，应用于地质勘探；升级阶段（1980-2010）：高压（3-5MPa）潜孔锤问世，效率提升2倍以上；智能阶段（2010至今）：集成传感器与远程监控系统，实现钻进参数自动调控。

3.2 技术发展趋势

高压大功率：采用3-5MPa高压空气驱动，冲击功突破500J，适用于深孔硬岩钻进；智能化与模块化：搭载物联网技术，实现远程诊断与参数优化；模块化设计便于维修更换；环保型装备：研发低噪声冲击器、喷雾除尘系统，减少粉尘与噪声污染；多功能组合：与螺杆钻具、套管钻机组合，适应复杂地层需求^[5]。

3.3 国内外技术对比

维度	国外技术	国内技术
设备性能	高压、大功率，稳定性强	中高压为主，部分设备达国际水平
工艺水平	智能化程度高，自动化控制	逐步实现智能化，需加强算法研发
应用范围	覆盖深孔、大孔径工程	以中小孔径为主，逐步拓展领域
自主创新	核心技术垄断	关键部件自主化，需突破高端市场

4 空气潜孔锤钻进技术的应用领域与案例分析

4.1 地质勘探与平洞掘进

水利水电勘探：在三峡工程坝基勘探中，采用组合式潜孔锤完成Φ150mm勘探孔，深度达300m，效率较传统方法提高40%；该技术能够有效应对坝基区岩溶发育、岩体破碎的复杂地层条件，在钻进过程中借助压缩空气强排渣能力，避免了传统泥浆钻进导致的孔壁堵塞、岩芯污染等问题，保障了勘探数据的准确性与可靠性。非爆破平洞掘进：某隧道工程采用Φ800mm组合式潜孔锤进行非爆破掘进，日进尺达5m，避免了爆破对周边建筑的影响；尤其适用于城市周边或文物保护区的隧道施工项目，其低振动、低噪声的作业特性可大幅降低对周边居民生活及历史遗迹的干扰，同时通过精准控制钻进参数，能有效维持洞室围岩的完整性，减少后期支

护成本投入^[6]。

4.2 矿山开采与充填钻孔

金属矿充填：某铜矿采用Φ200mm潜孔锤钻进尾矿充填孔，深度500m，单孔施工时间从10天缩短至3天；针对金属矿深部开采面临的高地应力、岩爆风险等问题，潜孔锤钻进可通过调节冲击频率与回转速度，实现对孔壁的柔性破碎，降低钻进过程中诱发岩爆的概率，且成孔质量高，能够满足尾矿充填浆液的顺畅输送要求^[7]。煤矿深孔钻进：某煤矿使用高压潜孔锤完成Φ300mm瓦斯抽采孔，深度800m，排渣效率提升30%；在高瓦斯煤层钻进作业中，该技术无需用水作为循环介质，从根源上规避了水与瓦斯混合引发的安全隐患，同时高压排渣系统可快速清除孔内煤粉，防止孔内瓦斯积聚，保障了井下作业人员的安全。

4.3 地热资源开发

在青海共和盆地干热岩项目中，采用Φ250mm高压潜孔锤钻进硬岩地层，深度达2000m，钻进效率较传统方法提高50%，为干热岩开发提供了技术支撑；干热岩地层具有岩石硬度高、渗透性差的特点，常规钻进技术存在钻头磨损快、钻进周期长等弊端，而高压潜孔锤凭借500J以上的高冲击功，可快速在岩体中形成裂隙并扩展破碎范围，为后续地热资源的规模化开采奠定了基础^[8]。

4.4 其他工程领域

桩基施工：某高层建筑桩基先导孔采用潜孔锤钻进，Φ120mm孔深60m，工期缩短20%；在城市高层建筑密集区域，潜孔锤钻进的扰动优势尤为突出，可有效避免传统钻进方式引发的周边地面沉降问题，且成孔垂直度高，能为后续桩基混凝土浇筑提供良好的孔壁条件。应急救援：地震救援中，使用小型潜孔锤快速钻进救援通道，为被困人员争取时间；除地震救援外，该技术还广泛应用于山体滑坡、泥石流等地质灾害的应急处置中，可快速钻进生命探测孔与注浆加固孔，小型化设备具备便携性强、操作简便的特点，能在复杂灾害现场迅速开展作业，大幅提升应急救援的效率与成功率。

5 空气潜孔锤钻进技术的关键问题与对策

5.1 常见技术问题与事故分析

冲击器堵塞：岩粉进入冲击器内部导致卡塞，对策为优化排粉风速（15-25m/s）、定期清理冲击器；钻具磨损：硬岩中钻头磨损快，对策为采用硬质合金或金刚石钻头；孔斜控制：深孔钻进易发生孔斜，对策为使用导向钻具或随钻测量系统。

5.2 复杂地层适应性研究

破碎带：采用套管跟进技术或泡沫钻进，增强孔壁稳定性；软弱围岩：降低冲击频率与转速，避免孔壁坍塌；高地应力：使用抗高压钻具，优化钻进参数。

5.3 环境保护与职业健康

粉尘控制：安装喷雾除尘系统或采用湿式钻进；噪声治理：使用消音器，降低冲击器噪声（ $\leq 90\text{dB}$ ）；振动控制：采用减震装置，减少对周边环境的影响。

6 空气潜孔锤钻进技术的经济效益与社会效益分析

6.1 经济效益评价

以某矿山充填钻孔工程为例，潜孔锤技术的应用使单孔成本降低25%，工期缩短70%，年节约成本超千万元。长期来看，设备寿命延长、维修费用降低，进一步提升经济效益。

6.2 社会与环境效益

安全提升：减少爆破作业，降低安全事故发生率；环境友好：无废水排放，粉尘排放量减少60%；职业健康：降低工人劳动强度，改善作业环境。

6.3 推广应用前景

随着“双碳”目标的推进，绿色勘探与智能施工需求增长，空气潜孔锤技术将在以下领域得到广泛应用：干热岩、页岩气等清洁能源开发；城市地下空间工程（如地铁、综合管廊）；应急救援与地质灾害治理。

7 结论与展望

空气潜孔锤钻进技术是一种高效、环保的钻进方法，具有显著的技术优势与应用价值。本文通过系统研究，得出以下结论：空气潜孔锤技术的核心是气动冲击与旋转复合破岩，适用于硬岩、破碎地层；技术发展趋势为高压、智能化、环保化；应用领域广泛，经济效

益与社会效益显著；需针对复杂地层与技术问题采取针对性对策。智能化控制系统：研发基于AI的钻进参数自动优化算法；多工艺融合：与螺杆钻具、定向钻进技术组合，适应复杂地层；标准化与产业化：制定行业标准，推动高端设备国产化。加强产学研合作，促进技术创新与成果转化；加大政策支持，鼓励企业研发高端装备；培养专业人才，提升行业技术水平。

参考文献

- [1]金棋武,杨讷. 空气潜孔锤在基岩地层地下连续墙造孔成槽的应用 [J]. 价值工程, 2025, 44 (13): 1-3.
- [2]张杰丰,张九宇,董凯飞,等. 空气潜孔锤钻进技术在充填钻孔施工中的应用 [J]. 地质装备, 2024, 25 (06): 36-40.
- [3]罗宏保,李俊萍,吴金生. 高温硬岩空气潜孔锤钻头设计 [J]. 钻探工程, 2021, 48 (04): 60-65.
- [4]雪彦宏,马江. 空气潜孔锤+气举反循环组合钻井技术在地热资源勘查中的应用 [J]. 科学技术创新, 2022, (31): 66-69.
- [5]李阳. 空气潜孔锤及气举反循环钻进技术在水井施工中的应用 [J]. 内蒙古煤炭经济, 2022, (01): 135-137.
- [6]石荆京,张海林,苏园园,等. 空气潜孔锤钻进技术在舜皇山基岩地热深井的应用 [J]. 钻探工程, 2021, 48 (10): 36-42.
- [7]王立峰,张晓昂,徐影. 单体大直径空气潜孔锤钻井工艺研究及应用 [J]. 中国煤炭地质, 2021, 33 (08): 65-67.
- [8]肖春阳,申策,吴红. 空气潜孔锤正循环大孔径裸钻成孔排渣关键技术研究 [J]. 四川地质学报, 2021, 41 (02): 330-332+337.